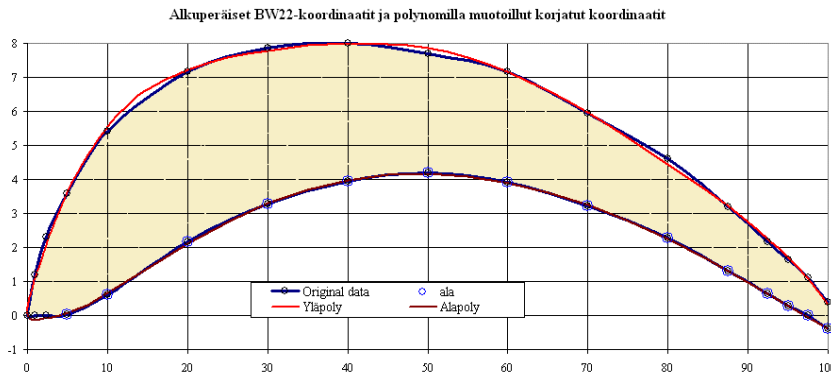
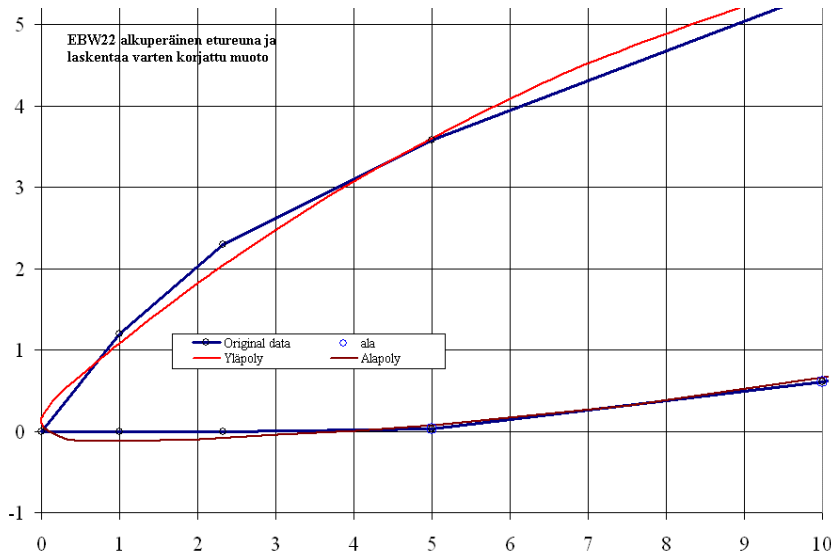


## WAKE-profiilin kehittälyä

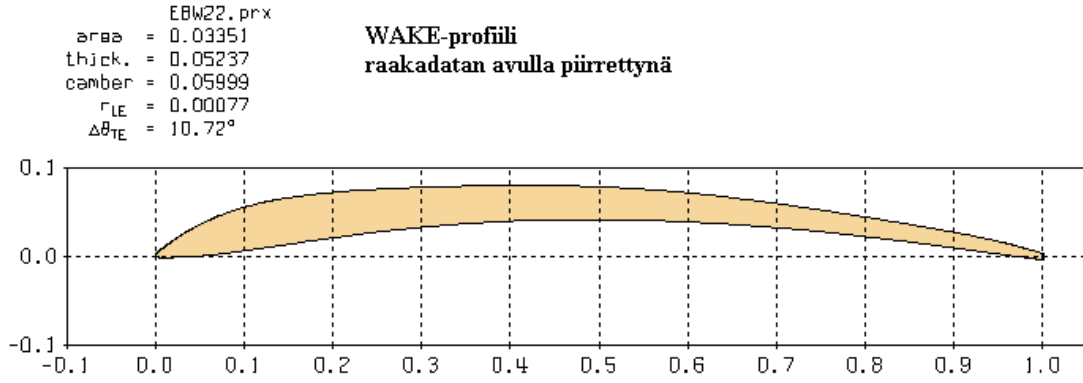
Alkuprofiilina käytetään Bob Whiten profiilin BW22 koordinaatteja, jotka Tapio Linkosalo on ystävällisesti antanut käyttöni. Profiilin koordinaatteja lisätään aluksi siten, että etureunaan saadaan riittävän tiheästi pisteitä, jotta pisteiden välinen kulma ei olisi laskennan kannalta liian terävä. WAKE-käytössä etureuna on tehty teräväksi kiilaksi, jolla saadaan aikaan etureunasta alkava turbulenssi.



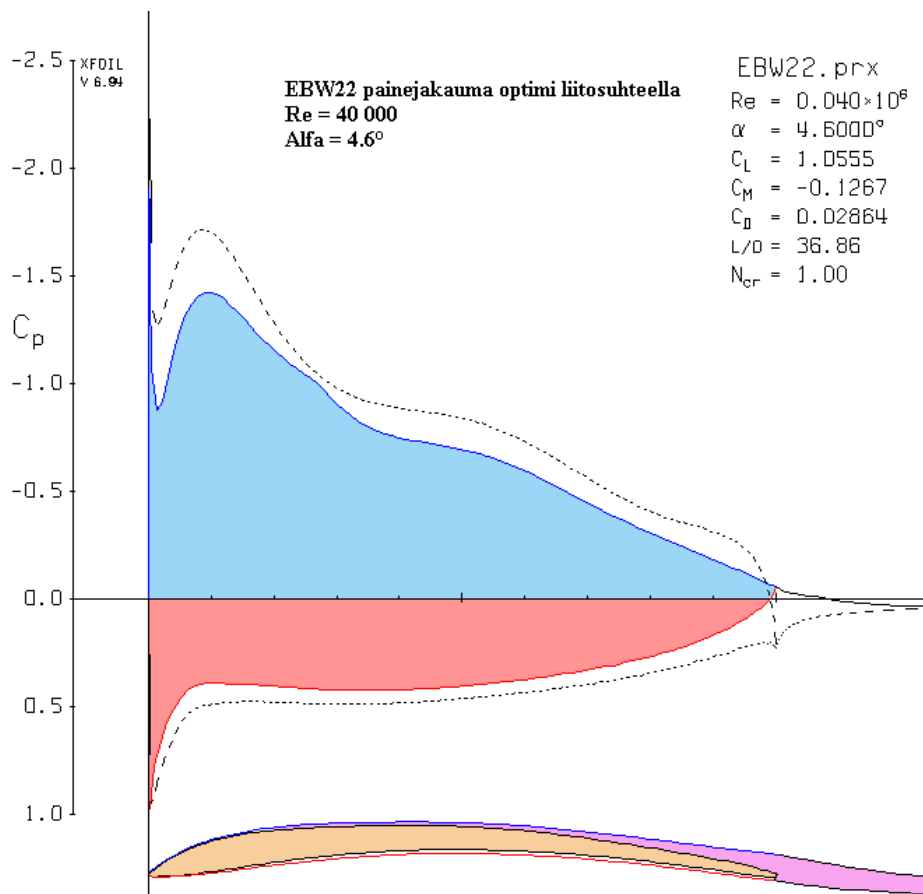
**Kuva 1** B22 alkuperäinen profiili (mustalla) ja siitä käytetty 6<sup>o</sup>-polynomilla siistitty muoto, jota on käytetty laskennan aloittamiseksi. Jatkossa tästä profiilista käytetään nimitystä BW22.PRX. Kuvassa paksuus on huomattavasti liioiteltu erojen havaitsemiseksi.



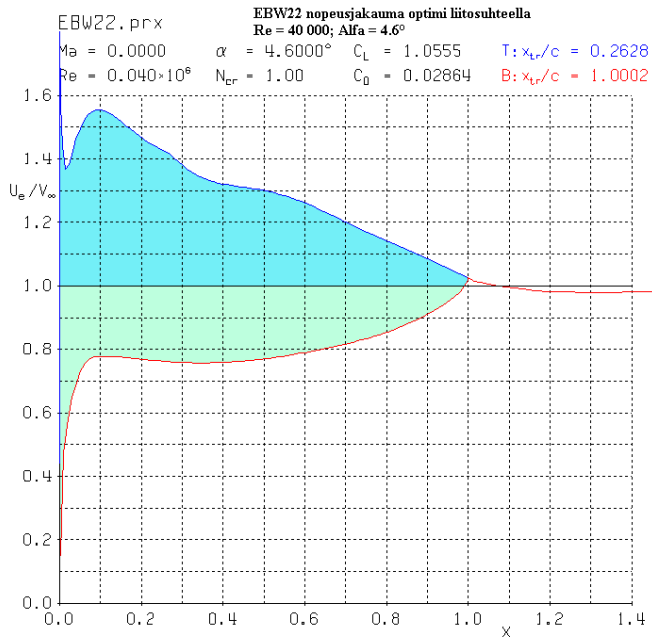
**Kuva 2** Profiilin BW22 ja EBW22.PRX:n etureunassa käytetty pyöristys ja alkuperäinen BW22 (pyöristämätön muoto, terävä kulma etureunassa)



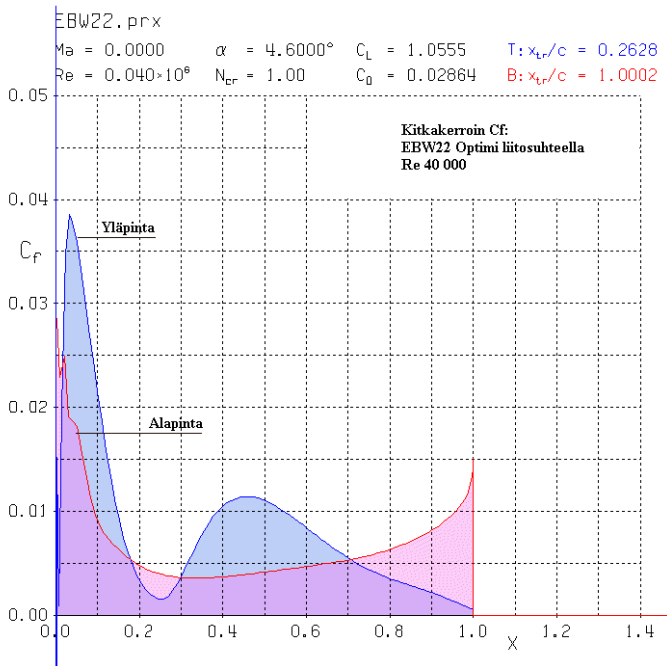
Kuva 3 Polynomilla modifioitu profiili EBW22.PRX siirrettynä laskentaohjelmaan.



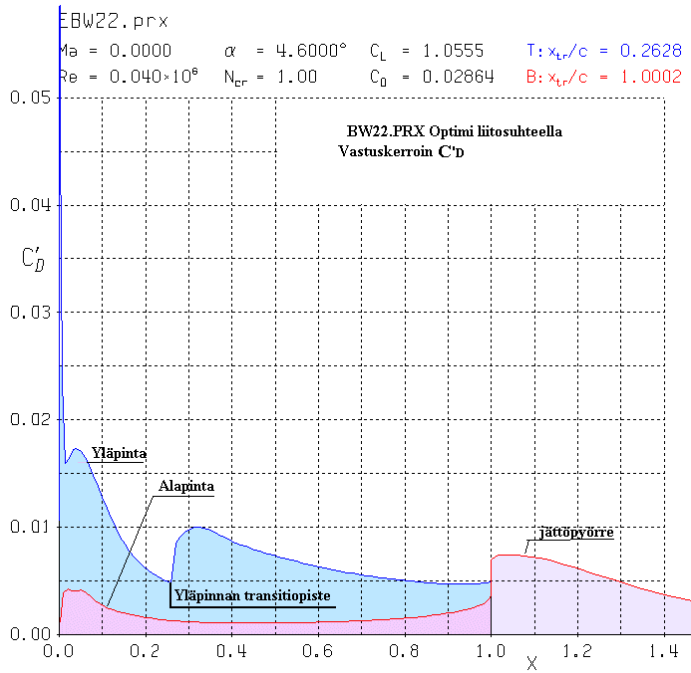
Kuva 4 EBW22.PRX profiilin painejakauma optimi liitosuhteella. Sininen on alipainetta ja punainen ylipainetta. Rajakerros on violetilla.



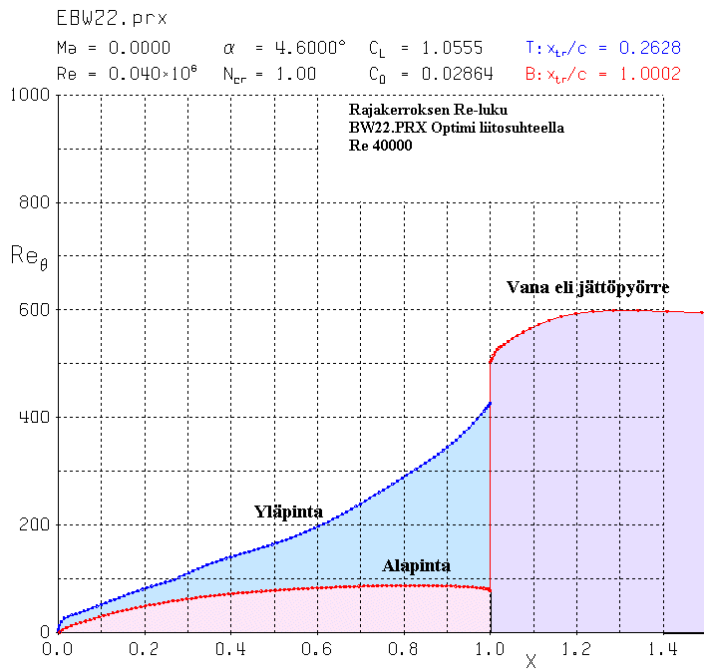
**Kuva 5 EBW22.PRX nopeusjakauma optimi liitosuhteella. Jakauma vastaa painejakaumaa. Sininen on ympäröivää ilmaa suurempi nopeus ja vihreä sitä pienempi. Nopeusero ylä- ja alapinnan välillä muodostaa nostovoiman. Nopeuserosta käytetään nostovoiman syntyä selittävässä teoriassa. myös termiä sirkulaatio.**



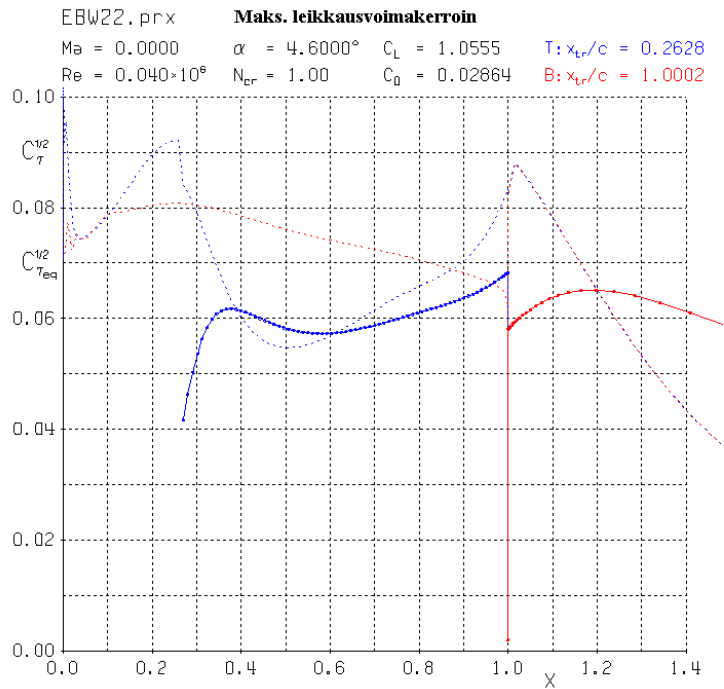
**Kuva 6 EBW22.PRX –profiilin kitkakerroin. Yläpinta on sinisellä (korkeampi käyrä) ja alapinta lilalla.**



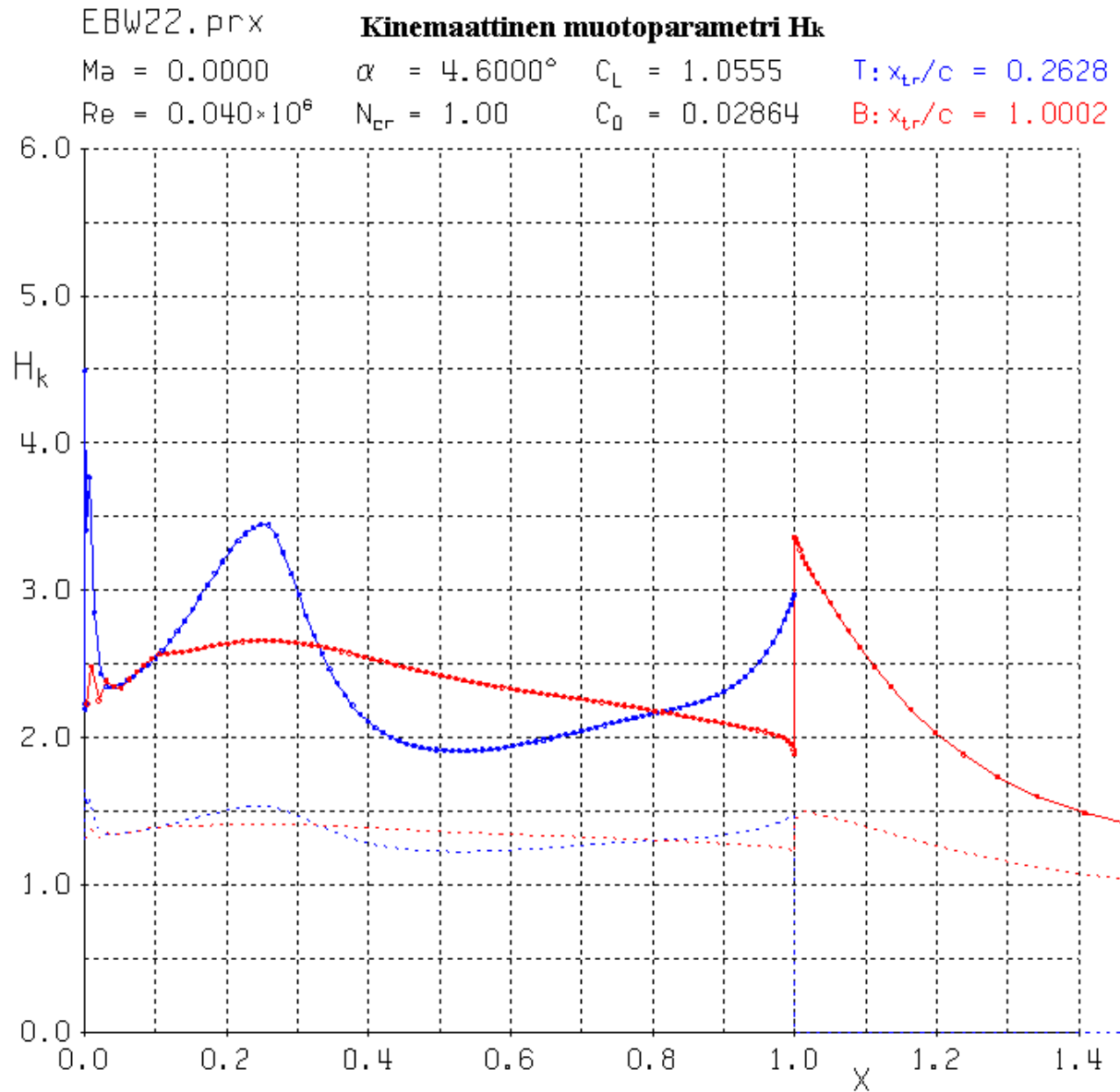
**Kuva 7 EBW22.PRX: Profilin vastuskerroin  $C'_D$ .** Vastuskerroin osoittaa, missä kohdassa syntyy vastusta. Siinä yhdistyy kitka- ja painevastus. Transiitipiste näkyy voimakkaana vastuksen kasvuna.



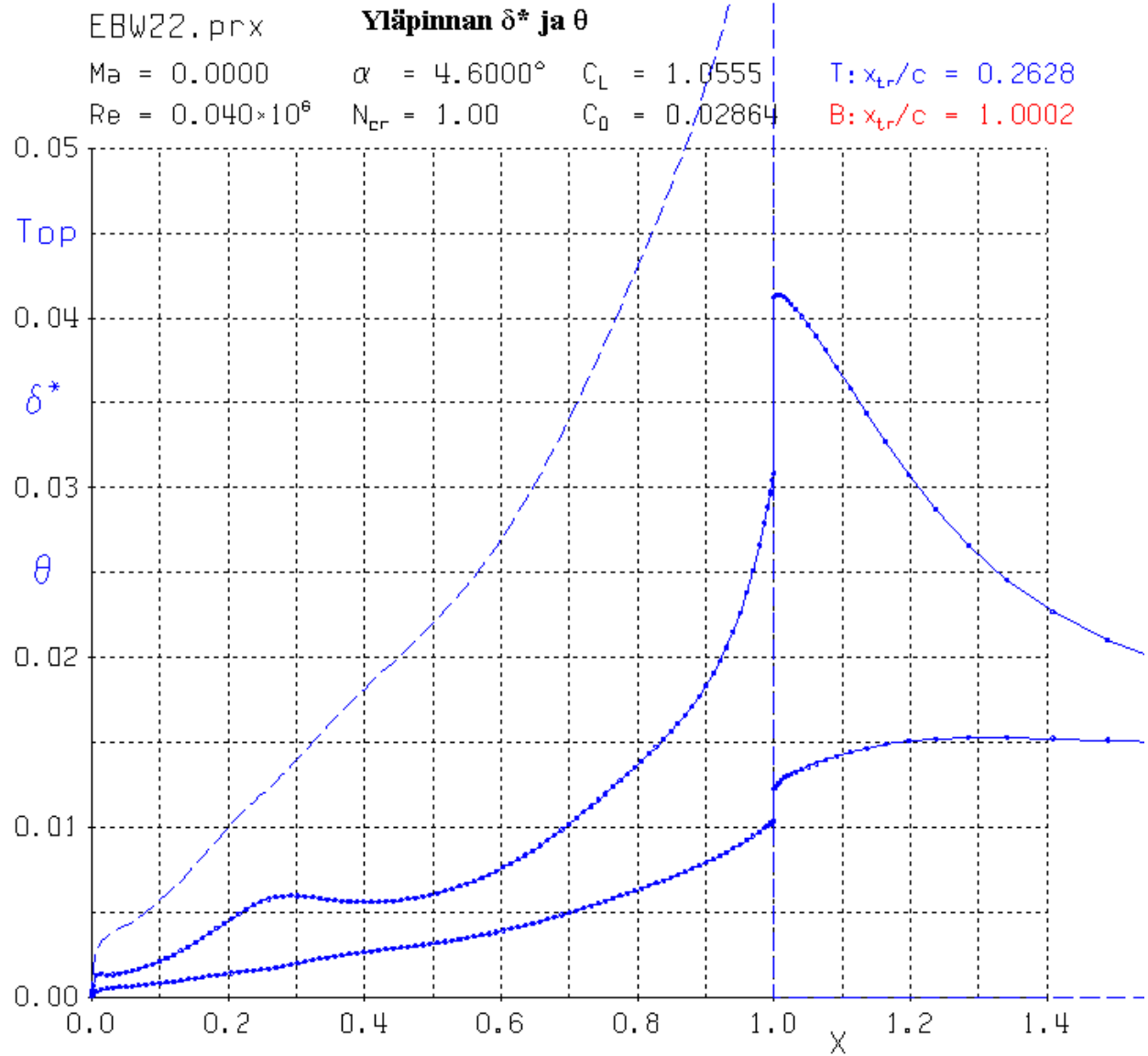
**Kuva 8 EBW22.PRX Rajakerroksen Re-luku.**



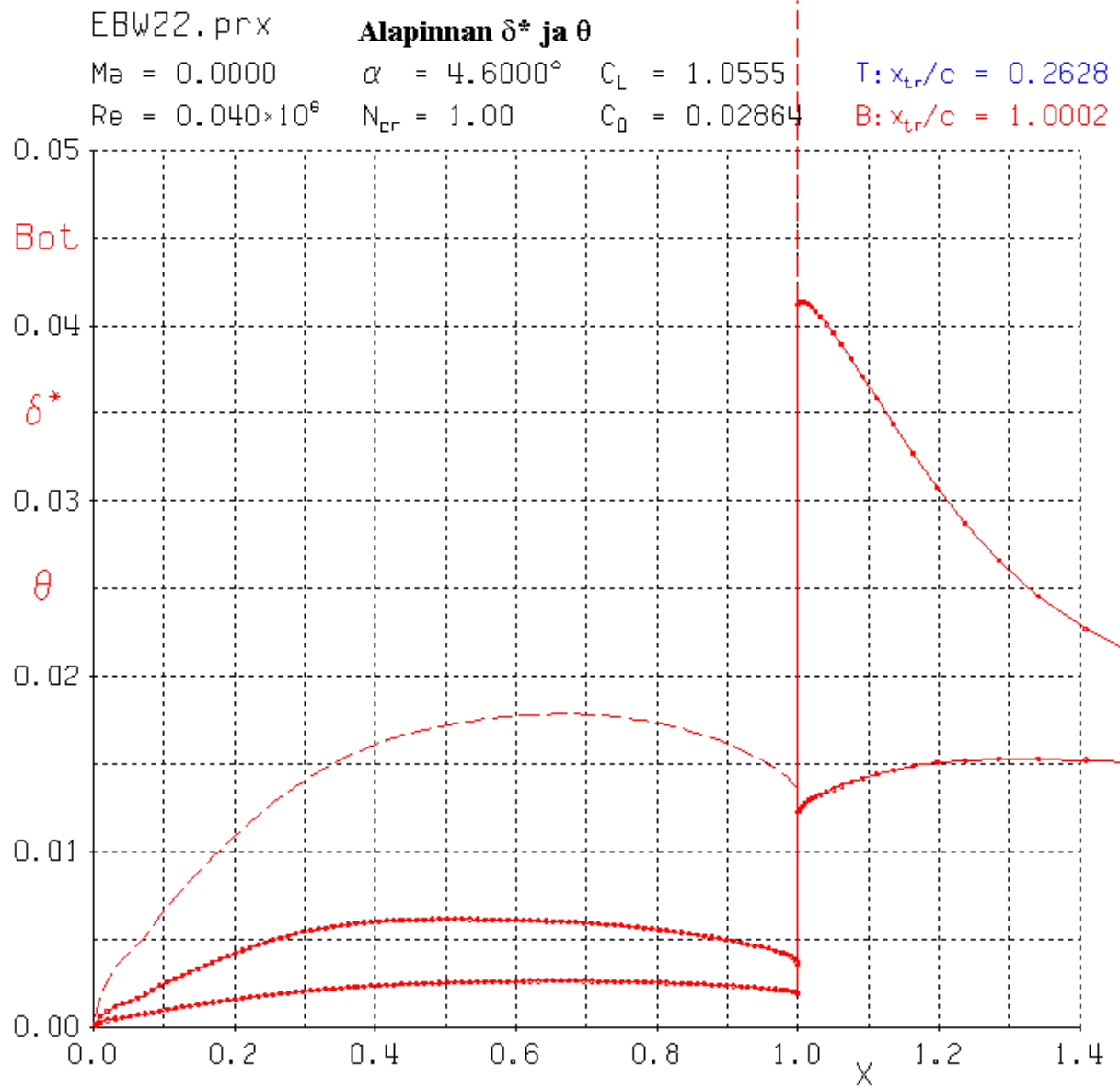
**Kuva 9 EBW22.PRX Optimi liitosuhteella. Maksimi leikkausvoimakerroin.**



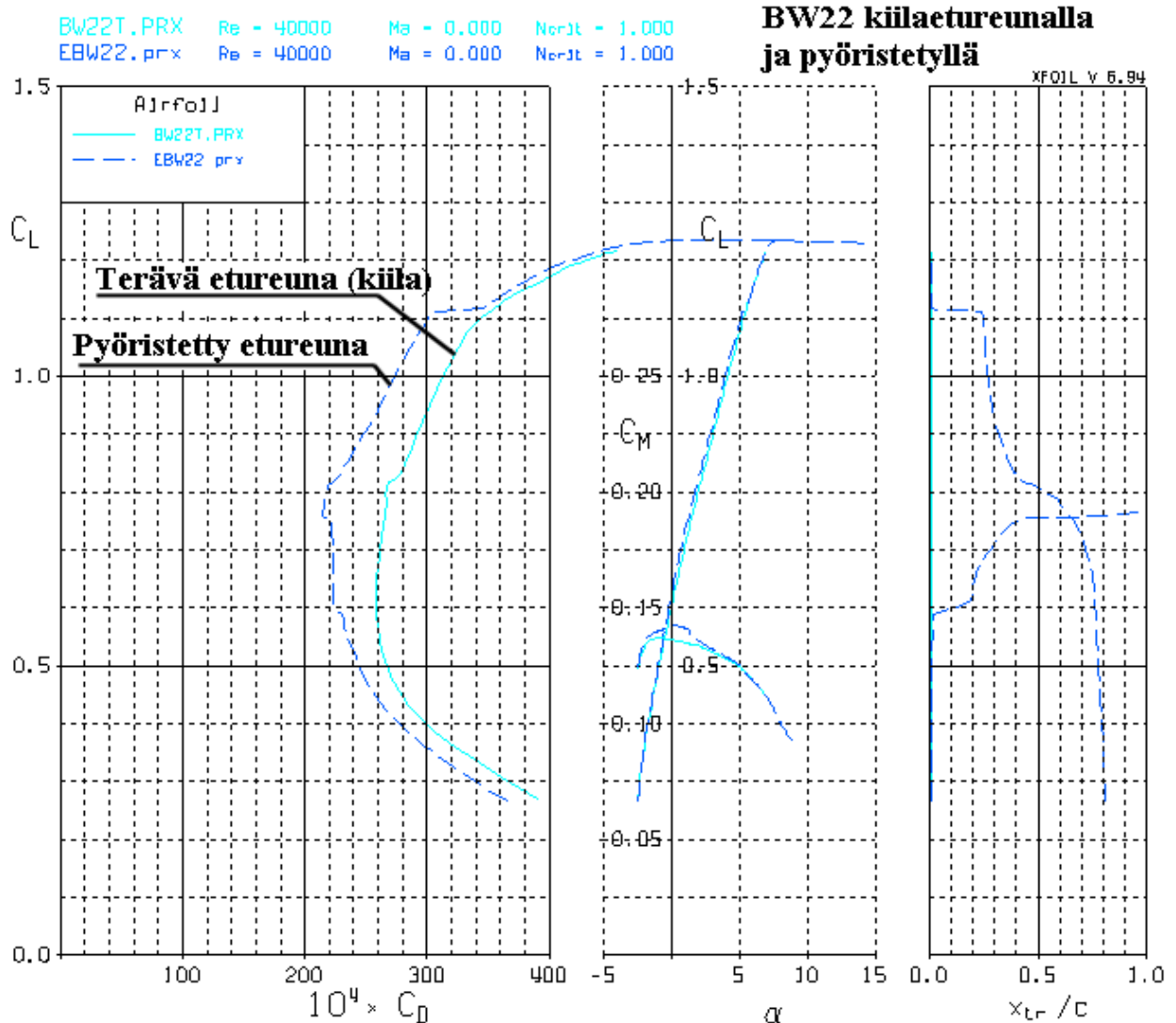
Kuva 10 EBW22.PRX Optimi liitosuhteella. Kinemaattinen muotoparametri  $H_k$ .



Kuva 11 EBW22-PRX Optimi liitosuhteella. Yläpinnan  $\delta^*$  ja  $\theta$ .



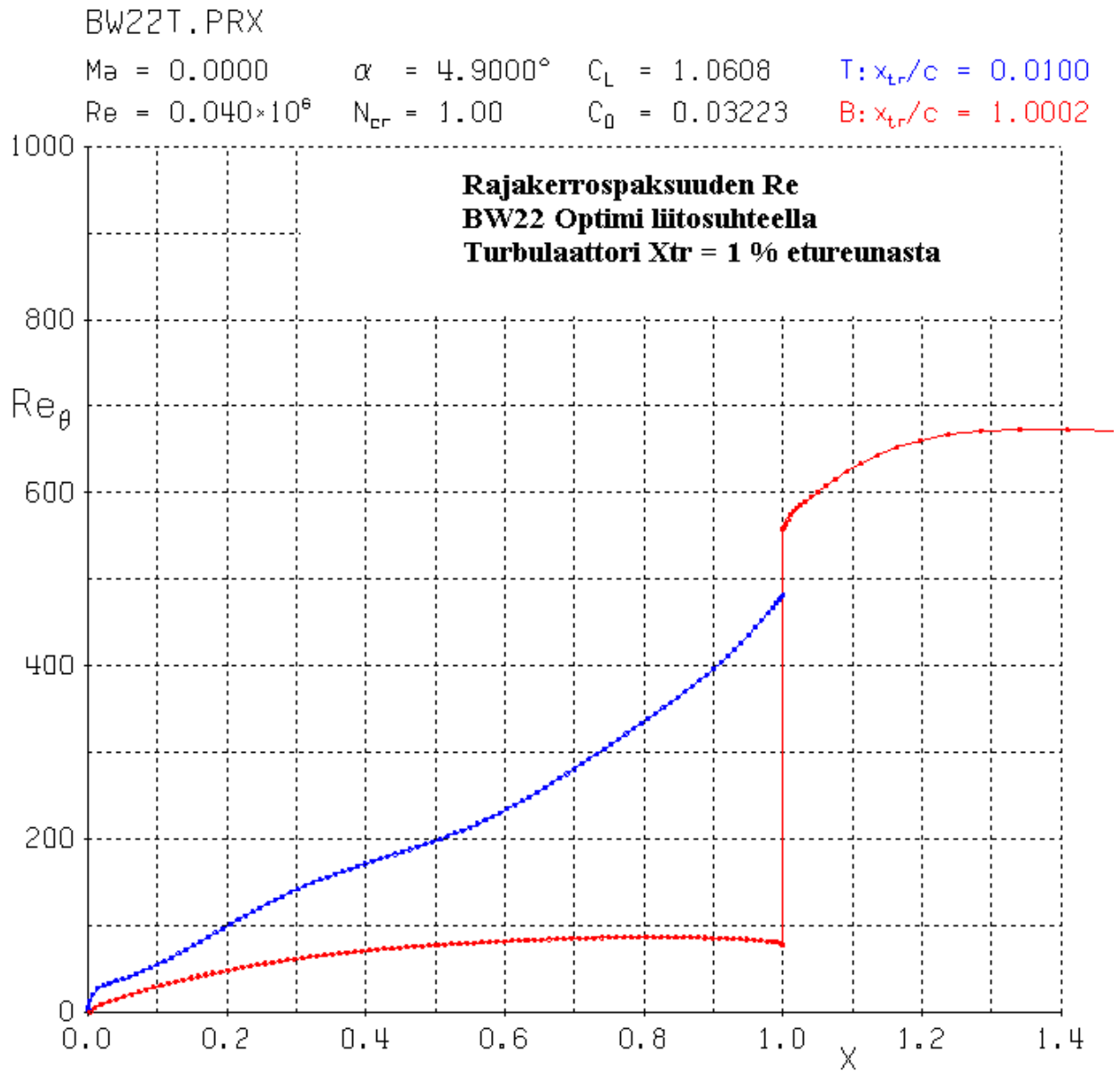
Kuva 12 EBW22.PRX Optimi liitosuhteella. Ala Yläpinnan  $\delta^*$  ja  $\theta$ .



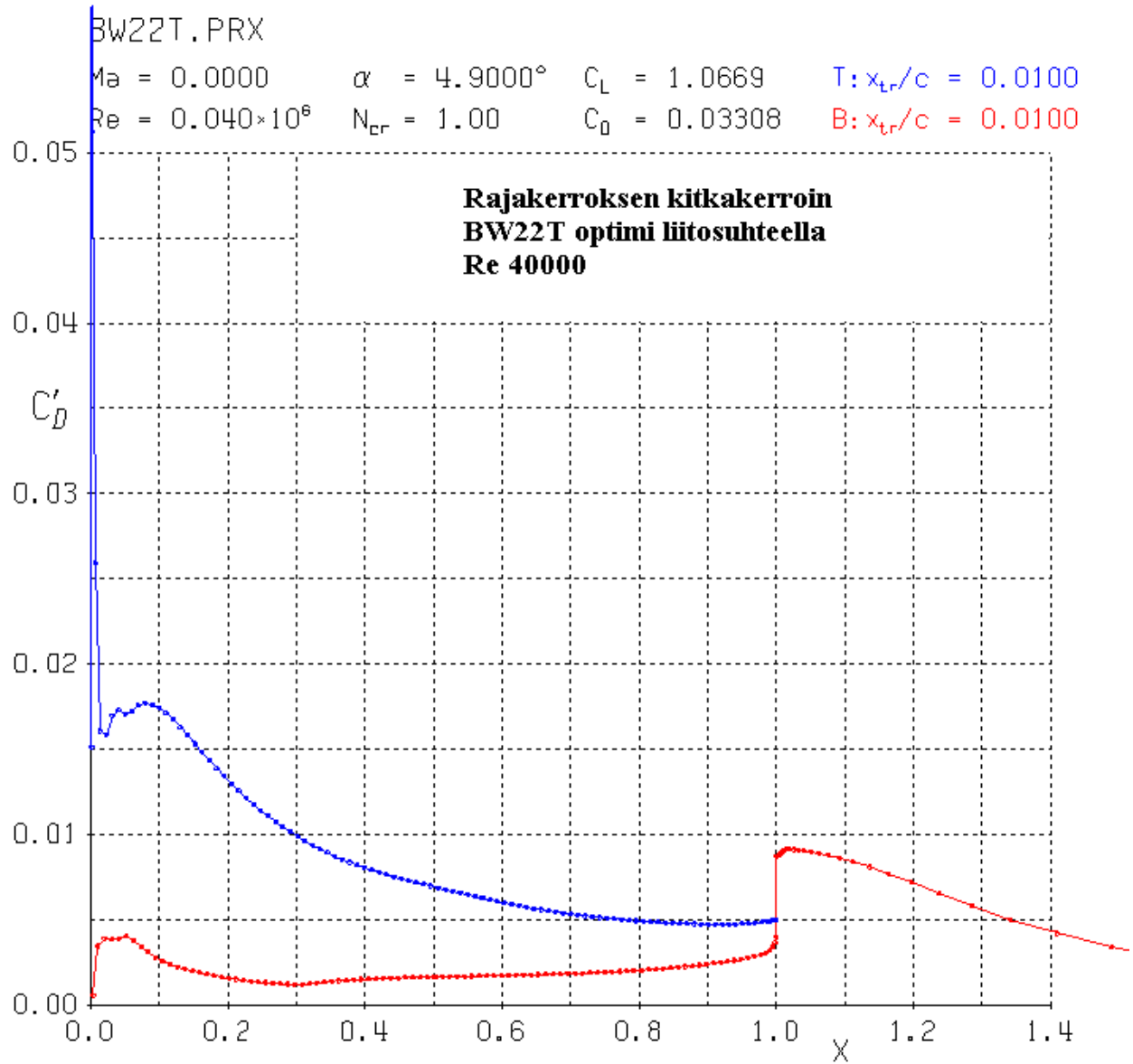
**Kuva 13. BW22-profiilin polaari.** Terävää etureunaa on laskelmassa simuloitu laittamalla turbulaattori 1% etäisyydelle etureunasta. (Turbulenssin aiheuttaminen on syy kiilamaisen etureunan käyttöön). Turbulenssi lisää vastusta mutta ei paranna nostovoimaa. Luonnollinen transitiopiste noin 25% etureunasta on riittävä tässä tapauksessa. Tämä saadaan aikaan joko karheahkolla verhouksella tai turbulaattorilla. Turbulaattorin tehtävänä on pienentää profiilin kokonaisvastusta, joka saavutetaan sillä, ettei virtaus irtoa takaosassa, mikäli rajakerros on turbulenttinen riittävän aikaisin. Turbulaattoria käytettäessä kitkavastus kasvaa, mutta painevastus pienenee siitä mitä se olisi ilman turbulaattoria. Turbulaattorin hyödyllisyys riippuu siitä, kumpi vastusmuoto on suurempi. Turbulaattorin oikea sijoitus on siksi tärkeä. Liian edessä oleva turbulaattori aiheuttaa enemmän vastusta kuin etäämmällä sijaitseva turbulaattori. Pienellä kohtauskulmalla virtaus ei välttämättä irtoa ollenkaan, joten turbulaattorista on ainoastaan haittaa lisääntyneen vastuksen muodossa. Vasta kohtauskulman kasvaessa tarvitaan turbulaattoria ja silloinkin mahdollisimman takana. Mikäli transiatio tapahtuu luonnollisella tavalla ja estää samalla virtauksen irtoamisen, ei turbulaattoria tarvita ollenkaan.

Eturunaturbulaattorin vaikutus näkyy myös rajakerroksen  $Re$ -luvussa kuten kuvassa 14 on osoitettu.

Rajakerroksen paksuus vaikuttaa vastukseen. Verrattaessa ilman turbulaattoria (kuva 8) ja turbulaattorilla olevia profiileja, on ilman turbulaattoria Re-luku noin 10% pienempi kuin turbulaattorin kanssa.



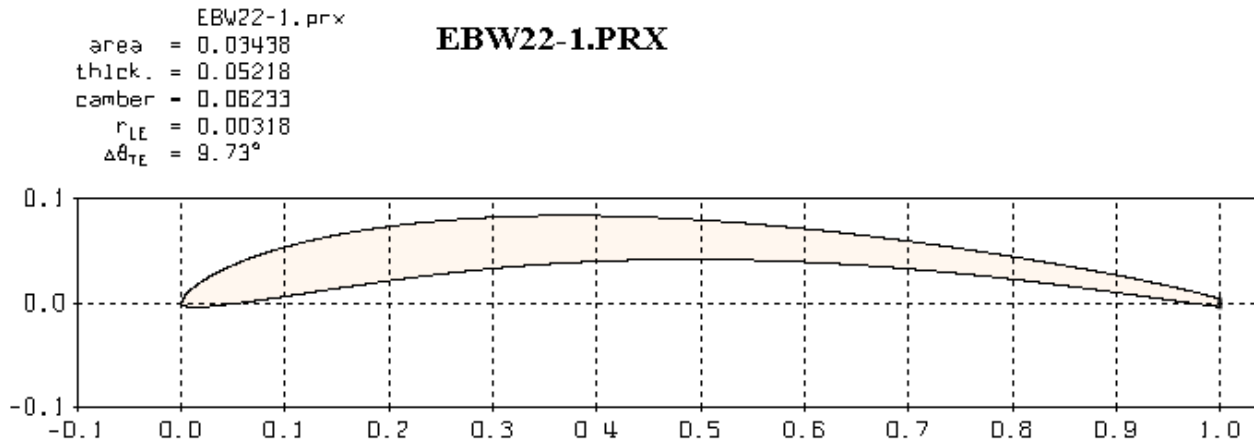
**Kuva 14** BW22T eli kiilamaisella etureunalla varustetun profiilin rajakerroksen Re-luku. Vastaava käyrä ilman turbulaattoria on kuvassa 8. Mitä paksumpi  $Re_\theta$  on, sitä suurempi on rajakerroksen vastus.



Kuva 15. BW22T Optimi liitosuhteella. Rajakerroksen vastuskerroin  $C'_D$ . Tätä kuvaa tulee verrata kuvaan 7, jossa on esitetty sama tilanne ilman etureunaturbulaattoria.

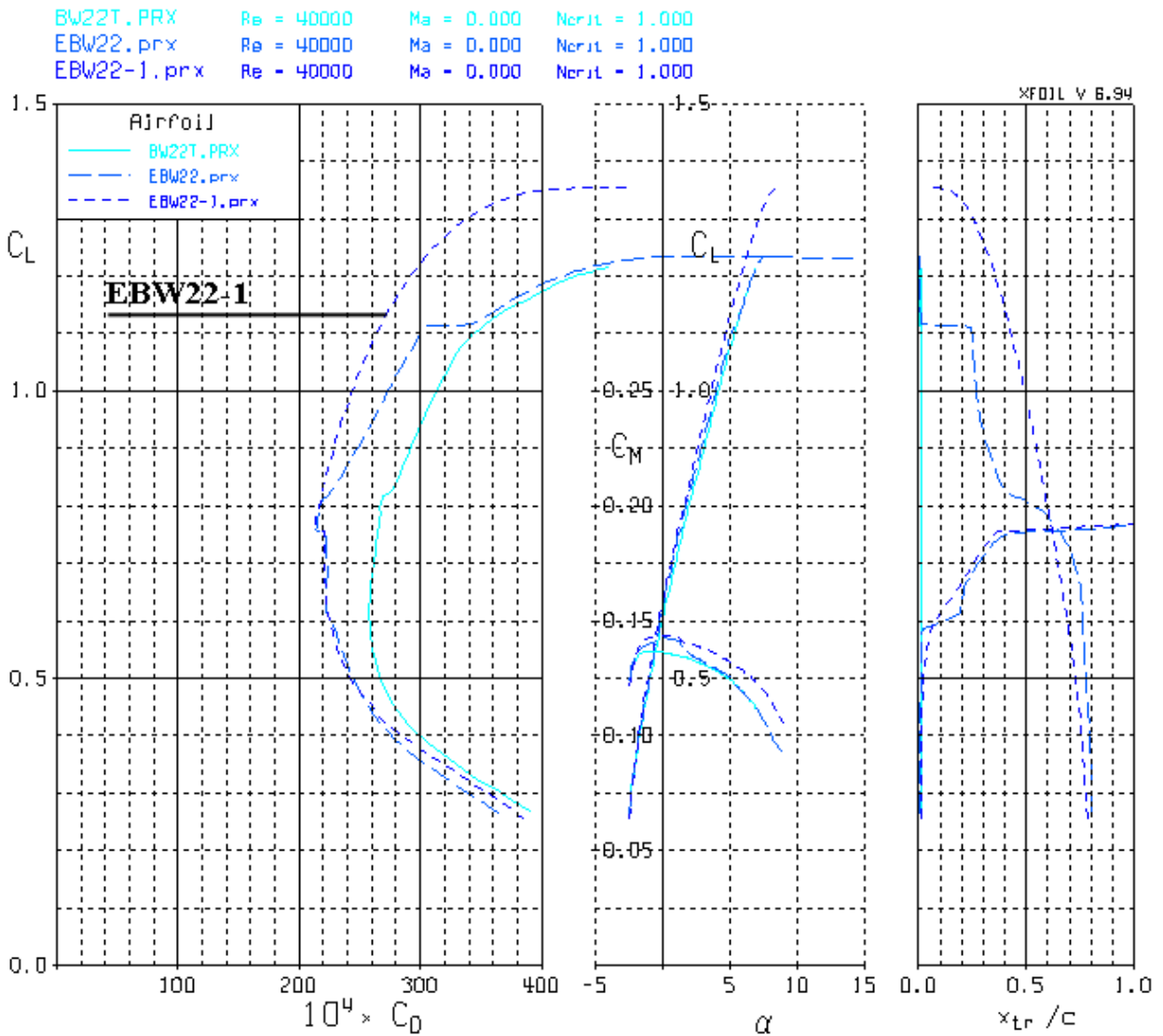
## Profiilin siistiminen

Profiilin muodon parantelu eli siistiminen alkaa painejakaumasta, joka oli esitetty kuvassa 4. Äärimmäisen terävästä etureunasta johtuen kuvaajan alussa on terävä piikki, joka tarkoittaa erittäin suurta paikallista nopeutta. Piikistä on päästävä eroon muotoilemalla etureuna uudestaan. Tämä tehdään poistamalla painejakaumasta tämä piikki ja laskemalla sen jälkeen uusi profiili, joka vastaa tätä painejakaumaa. Annetaan uudelle profiilille tunnus EBW22-1.prx.



**Kuva 16** Uudistettu profiili EBW22-1, joka vastaa alkuperäistä, mutta on aerodynaamisesti puhtaampi.

### Profilin siistimisen jälkeinen polaari



**Kuva 17** EBW22-1.PRX Polaari verrattuna edellisiin. Polaari on selkeästi parempi, kuin aiemmat. Nostovoima on parempi ja käyttäytyminen hyvin tasainen, jonka osoittaa siististi kaareutuva polaari sekä oikeanpuoleisen kuvaajan osoittama transitio-käyttäytyminen. Yläpinnan transitio piste siirtyy tasaisesti etureunaa kohti kohtauskulman kasvaessa. Tämä pitää huolen siitä, että virtaus pysyy kiinni mahdollisimman pitkään eikä erillistä turbulaattoria tarvita. Olettaisn, että tämä on ihanteellista WAKE-käyttäytymistä.

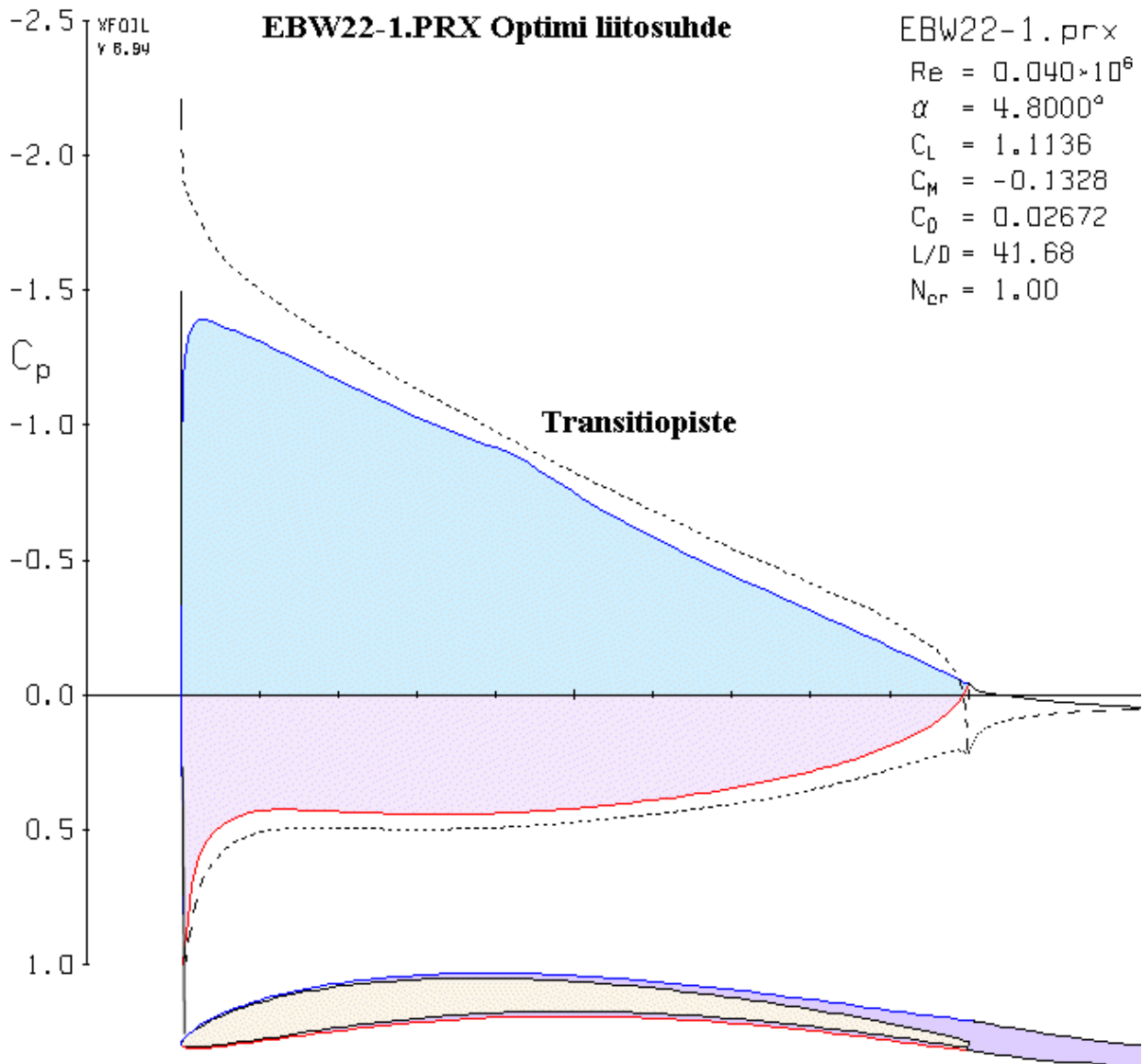
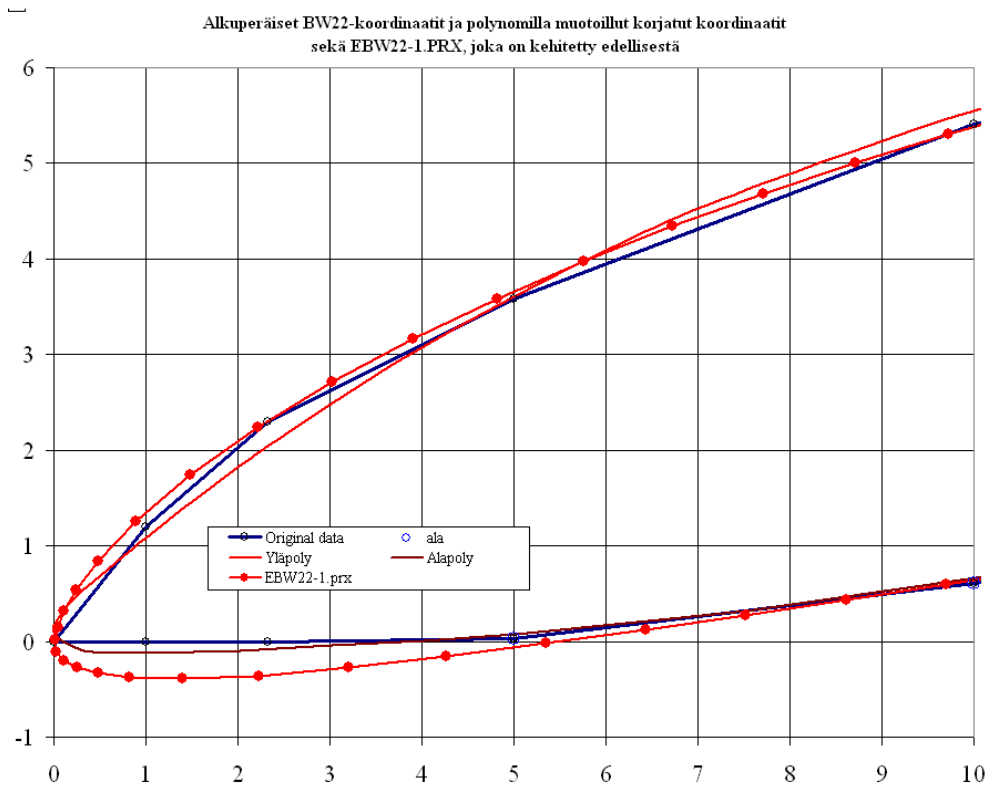


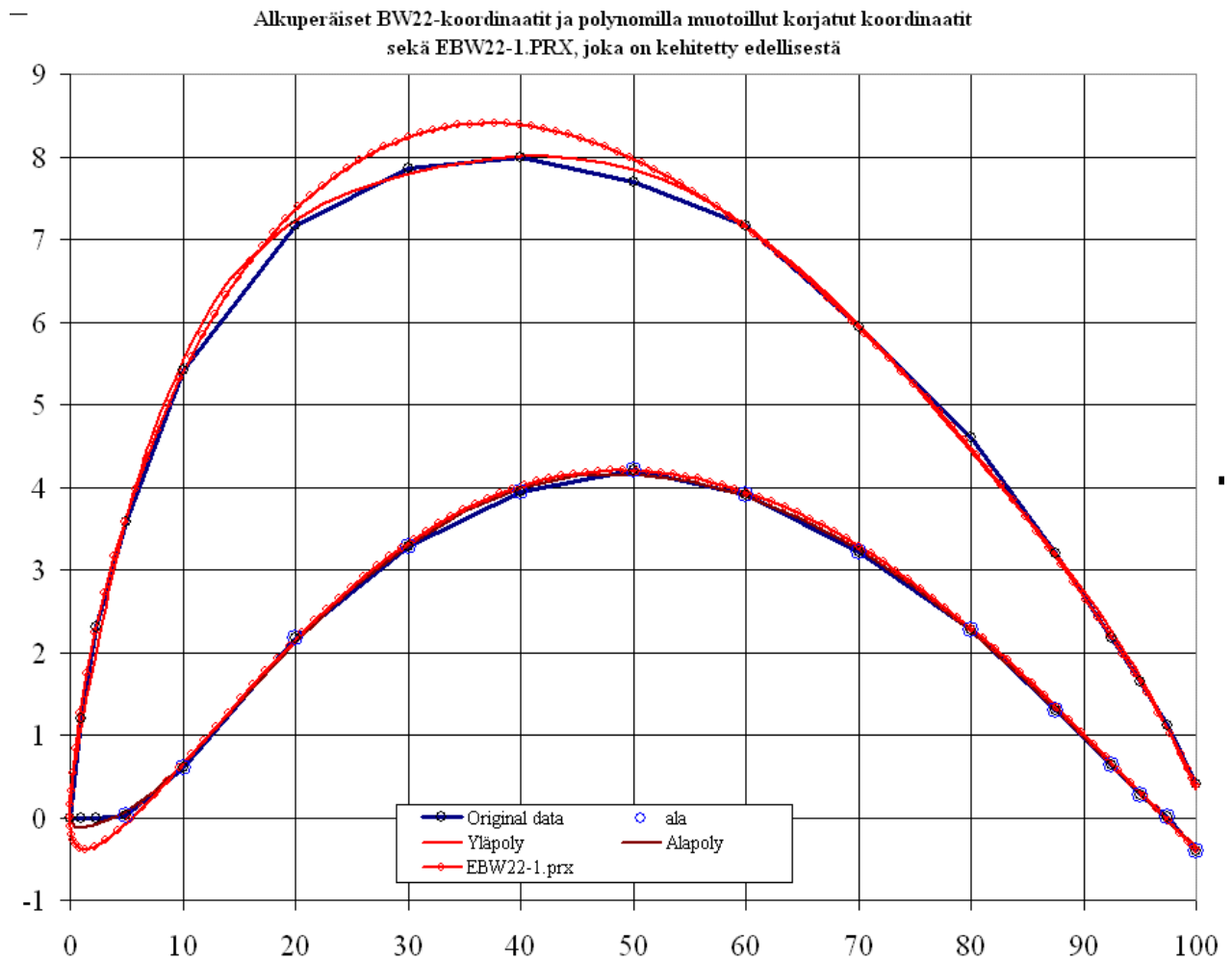
Figure 1

Kuva 18. EBW22-1.PRX -profiilin painejakauma optimi liitosuhteella. Transitiopiste näkyy yläpinnan jakaumassa kyhmyinä.

Mielenkiintoista on tietysti, kuinka paljon alkuperäinen profiili on muuttunut siistittäessä. Seuraavassa kuvassa 19 on esitetty profiilin etureunan uusi muoto verrattuna alkuperäiseen.



Kuva 19. Profiilin etureunan muoto ennen ja jälkeen uudistuksen. EBW22-1.PRX on uusi muoto.



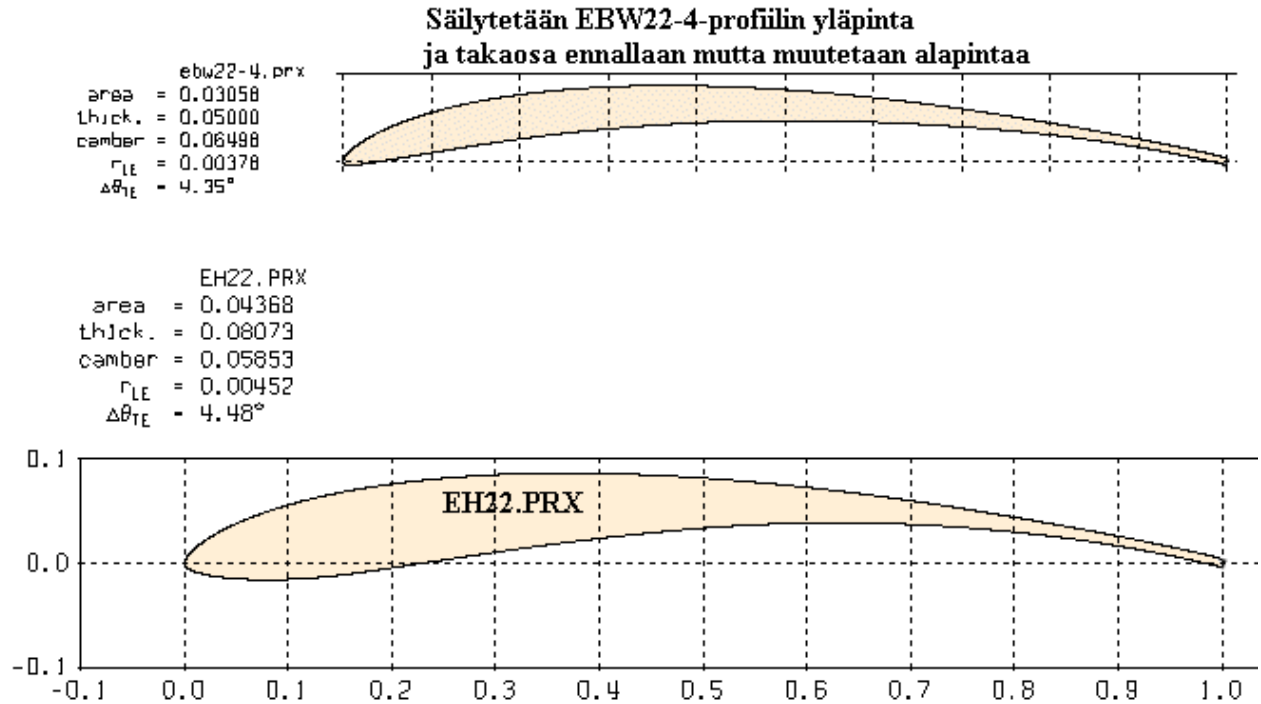
**Kuva 20. Profiilin uusi muoto verrattuna vanhaan. Keskeisin muutos on etureunan pyöristys ja selkäosan kaarevuuden tasaantuminen. Paksuutta on merkittävästi liioiteltu erojen erotettavuuden parantamiseksi.**

Jatketaan profiilin kehittelyä muotoilemalla alapintaa ja annetaan sille uusi nimi EBW22-2.PRX

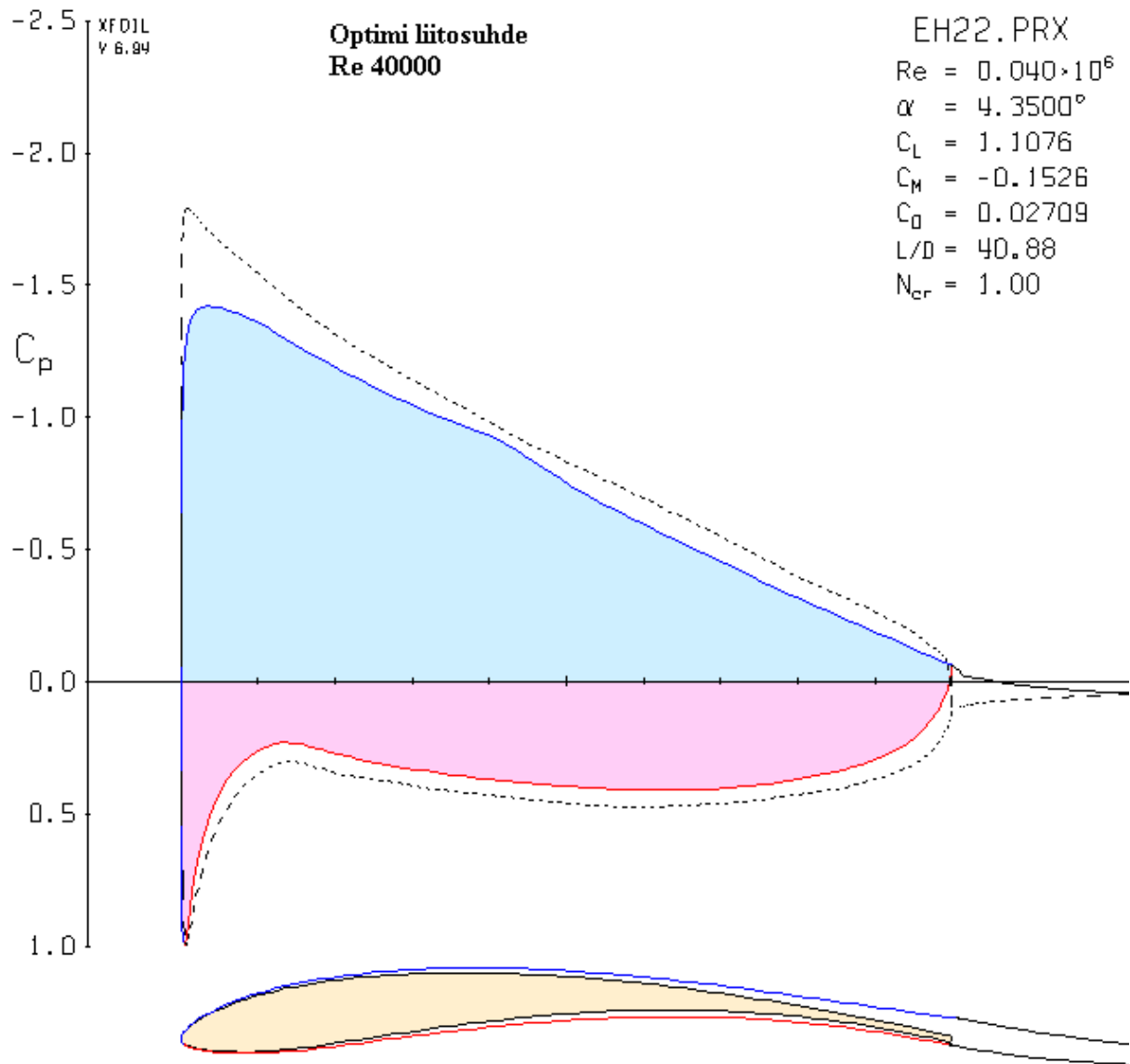
Kehitettiin profiilit EBW22-3.PRX ja EBW22-4.PRX

## Vastuksen pienentäminen pienellä kohtauskulmalla

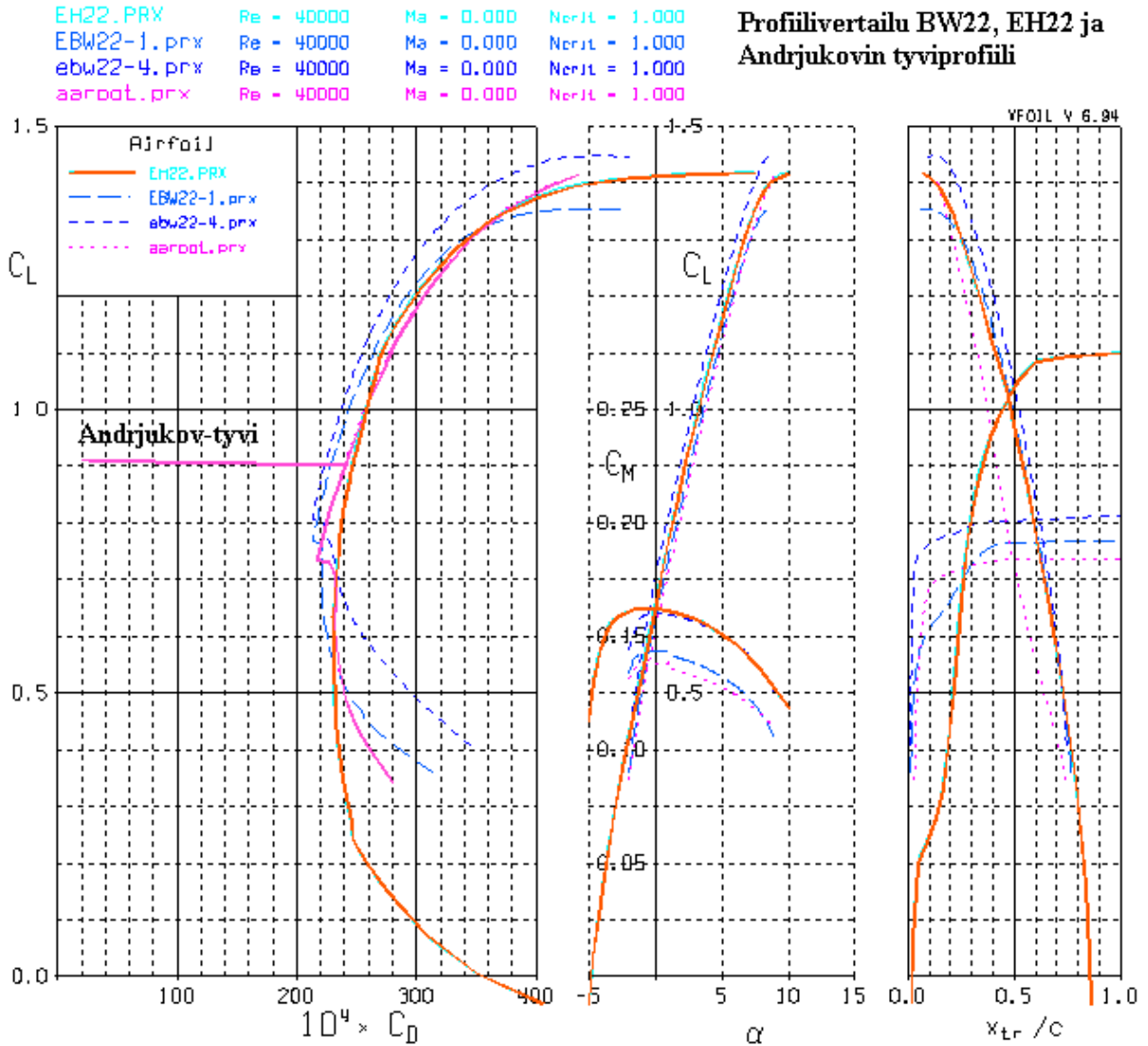
Muotoilla alapintaa siten, että virtauksen irtoamista etureunan alapinnalla ei tapahdu.



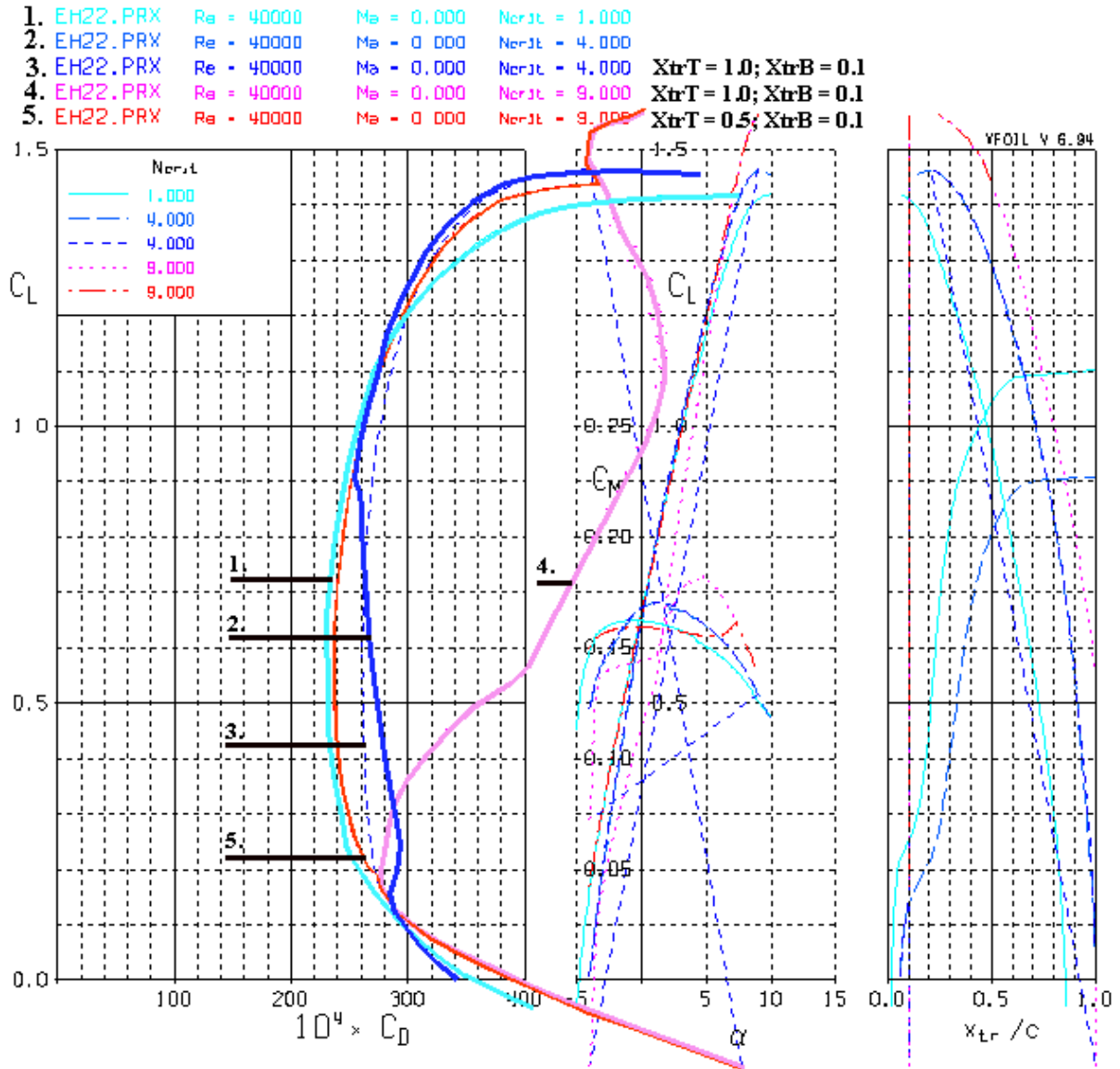
**Kuva 21.** Muodostettu uusi profiili EH22.PRX, jonka yläpinta on sama kuin edellä kehitetyllä EBW22-4-profiililla mutta alapinta on muotoiltu uudelleen, jotta saataisiin suurempi rakennepaksuus ja ennen kaikkea paremmat ominaisuudet lennettäessä pienellä kohtauskulmalla. Profiilin takaosa on jätetty ennalleen. Jättöreunan paksuus on 0.008% eli sama kuin alkuperäisellä BW22-profiililla.



**Kuva 22.** EH22.PRX- profiilin painejakauma optimi liitosuhteella. Liitosuhde on lähes ennallaa huolimatta huomattavasti paksummasta profiilista.



**Kuva 23.** Eräiden WAKE-profiilien polaarivertailu. Paras liitosuhde on profiililla EBW22-4:llä mutta laajin toiminta-alue on profiililla EH22, jonka käyttäytyminen on myös hyvin johdonmukainen koko toimialueella. Profiili ei myöskään tarvitse turbulaattoria, mikäli siiven pinta on sopivan karhea.



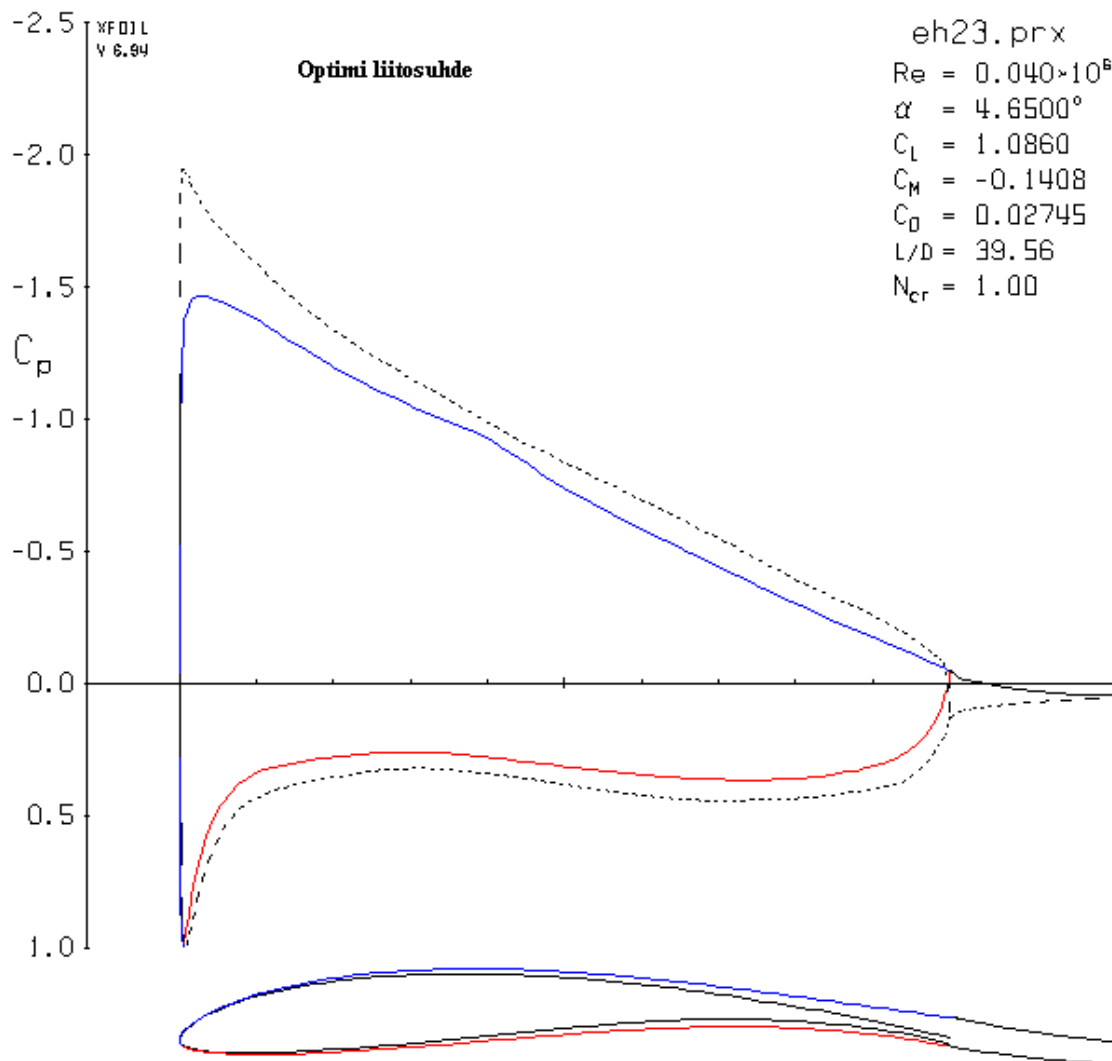
**Kuva 24.** Turbulaattorin vaikutus polaariin. Alhaisella Re-luvulla profiilin pinnan on oltava karhea (N = 1 Käyrä 1.). Sileällä profiililla vastus kasvaa merkittävästi ja ominaisuudet heikkenevät, mikä johtuu virtauksen irtoamisesta laminaarialueella. Sileällä profiililla voidaan käyttää turbulaattoria estämään tätä ilmiötä. Tässä tapauksessa on käytettävä turbulaattoria sekä ylä- että alapinnalla. Huomattakoon, että sileäpintaisella (N = 9 kuvaaja 5.) profiililla ei päästä yhtä hyvään tulokseen kuin karheapintaisella (1.) edes turbulaattoreiden avulla. Mistä tietää, mikä on oikea pinnan karheus? Liian karhea pinta aiheuttaa vastusta ja heikentää suoritusarvoja mutta käyttäytyminen on juoheaa. Kun profiili on liian sileä, sen käyttäytyminen tulee arvaamattomaksi. Tietyissä tilanteissa liitokyky on mahtava, mutta yks'kaks lennokka nyökkää ja menettää stabiilisuutensa. Tällöin tarvitaan turbulaattoria tai uutta rakennettaessa voisi käyttää hieman karheampaa verhousta. Turbulaattori kannattaa sijoittaa mahdollisimman taakse (55%), jotta sen aiheuttama vastuksen lisä olisi pienin mahdollinen. Mikäli epästabiilisuutta esiintyy eikä sitä saada korjattua painopisteen korjauksella, siirretään yläpinnan turbulaattoria eteenpäin 5 % kerrallaan kunnes riittävä vakavuus saavutetaan. Virittäessä on huomattava, että lennokille on etsittävä uudestaan mahdollisimman hyvä vakavuus jokaisella turbulaattorin asetuksella. Ellei tämä onnistu, vasta sitten siirretään turbulaattoria eteen päin. Alapinnan turbulaattorin tarve tulee vastaan nopeasti lennettäessä ja sen avulla estetään kuplan syntyminen etureunan alapinnalle ja siitä johtuva vastuksen kasvu. Alapinnan turbulaattorin tulee yleensä sijaita hyvin lähellä etureunaa. Hyvä nyrkkisääntö voisi olla seuraava. Kun profiili lepää vaakasuorassa asennossa

tasaisella pinnalla, turbulaattorin paikka on etureunaa lähinnä oleva kosketuskohta. Samaa sääntöä voi soveltaa myös yläpinnan turbulaattorin paikkaan, pinta on vaakasuorassa olevan profiilin korkein kohta. (Profiili on vaakasuorassa, kun jänne on vaakasuorassa).

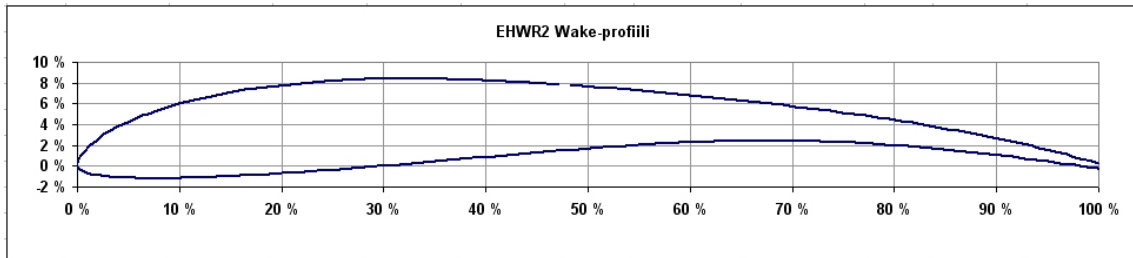
airfoil	Re	Mach	Ncrit	XtripT	XtripB
1 EH22.PRX	40000	0.000	1.00	1.000	1.000
2 EH22.PRX	40000	0.000	4.00	1.000	1.000
3 EH22.PRX	40000	0.000	4.00	1.000	0.100
4 EH22.PRX	40000	0.000	9.00	1.000	0.100
5 EH22.PRX	40000	0.000	9.00	0.500	0.100

Taulukko. Kuvassa 24 esitettyjen profiilien ominaisuudet.

Profiili näyttää vähän nuijalta, joten lisätään paksuutta ja muodostetaan vielä kerran uusi profiili, EH23.PRX



Kuva 25. EH23.PRX. Profiilin paksuutta on lisätty.



ehwr2.prx			Kehittäjä Erkki Haapanen, Tuulitaito			Saa käyttää vapaasti ja jatkaa kehitystä					
No	X	Y	No	X	Y	No	X	Y	No	X	Y
1	0.999980	0.002415	51	0.471345	0.078698	101	0.000279	0.002946	151	0.467308	0.014567
2	0.998671	0.002800	52	0.459753	0.079409	102	0.000038	0.001539	152	0.478955	0.015498
3	0.996264	0.003504	53	0.448167	0.080083	103	-0.000017	0.000269	153	0.490581	0.016411
4	0.993056	0.004432	54	0.436590	0.080716	104	0.000335	-0.000974	154	0.502182	0.017295
5	0.988542	0.005718	55	0.425020	0.081305	105	0.001238	-0.002084	155	0.513762	0.018144
6	0.982063	0.007527	56	0.413457	0.081849	106	0.002496	-0.003137	156	0.525321	0.018951
7	0.973394	0.009873	57	0.401899	0.082344	107	0.004094	-0.004170	157	0.536856	0.019709
8	0.963265	0.012512	58	0.390354	0.082787	108	0.006131	-0.005189	158	0.548377	0.020409
9	0.952526	0.015187	59	0.378822	0.083175	109	0.008738	-0.006209	159	0.559899	0.021051
10	0.941568	0.017793	60	0.367304	0.083502	110	0.012152	-0.007226	160	0.571421	0.021635
11	0.930504	0.020307	61	0.355803	0.083765	111	0.016741	-0.008242	161	0.582955	0.022161
12	0.919358	0.022735	62	0.344321	0.083956	112	0.022933	-0.009228	162	0.594501	0.022634
13	0.908145	0.025089	63	0.332857	0.084070	113	0.030945	-0.010110	163	0.606046	0.023055
14	0.896877	0.027379	64	0.321412	0.084103	114	0.040465	-0.010801	164	0.617597	0.023421
15	0.885574	0.029612	65	0.309988	0.084048	115	0.050918	-0.011276	165	0.629152	0.023738
16	0.874253	0.031786	66	0.298581	0.083901	116	0.061846	-0.011557	166	0.640691	0.024001
17	0.862919	0.033902	67	0.287195	0.083656	117	0.073008	-0.011679	167	0.652203	0.024204
18	0.851578	0.035958	68	0.275821	0.083309	118	0.084288	-0.011668	168	0.663692	0.024337
19	0.840228	0.037952	69	0.264462	0.082859	119	0.095629	-0.011540	169	0.675152	0.024395
20	0.828866	0.039885	70	0.253120	0.082301	120	0.107011	-0.011306	170	0.686594	0.024367
21	0.817497	0.041757	71	0.241794	0.081633	121	0.118430	-0.010975	171	0.698039	0.024253
22	0.806118	0.043566	72	0.230498	0.080853	122	0.129887	-0.010557	172	0.709496	0.024054
23	0.794726	0.045315	73	0.219238	0.079955	123	0.141384	-0.010066	173	0.720974	0.023778
24	0.783318	0.047004	74	0.208021	0.078928	124	0.152912	-0.009513	174	0.732469	0.023430
25	0.771889	0.048637	75	0.196846	0.077767	125	0.164466	-0.008905	175	0.743974	0.023016
26	0.760439	0.050218	76	0.185720	0.076463	126	0.176045	-0.008252	176	0.755463	0.022535
27	0.748968	0.051751	77	0.174639	0.075008	127	0.187642	-0.007561	177	0.767002	0.021987
28	0.737474	0.053242	78	0.163611	0.073397	128	0.199248	-0.006837	178	0.778526	0.021392
29	0.725960	0.054695	79	0.152644	0.071623	129	0.210863	-0.006082	179	0.790019	0.020735
30	0.714428	0.056112	80	0.141744	0.069676	130	0.222475	-0.005300	180	0.801505	0.020011
31	0.702878	0.057500	81	0.130927	0.067552	131	0.234083	-0.004489	181	0.812989	0.019221
32	0.691319	0.058860	82	0.120208	0.065238	132	0.245688	-0.003648	182	0.824459	0.018365
33	0.679753	0.060192	83	0.109605	0.062724	133	0.257293	-0.002776	183	0.835931	0.017440
34	0.668184	0.061498	84	0.099138	0.059996	134	0.268932	-0.001875	184	0.847399	0.016450
35	0.656614	0.062775	85	0.088824	0.057041	135	0.280582	-0.000960	185	0.858858	0.015396
36	0.645049	0.064023	86	0.078700	0.053846	136	0.292233	-0.000030	186	0.870304	0.014274
37	0.633483	0.065239	87	0.068788	0.050390	137	0.303894	0.000914	187	0.881745	0.013083
38	0.621917	0.066423	88	0.059107	0.046661	138	0.315555	0.001868	188	0.893181	0.011823
39	0.610355	0.067573	89	0.049747	0.042669	139	0.327215	0.002833	189	0.904629	0.010495
40	0.598794	0.068687	90	0.040809	0.038414	140	0.338890	0.003809	190	0.916097	0.009108
41	0.587226	0.069766	91	0.032405	0.033915	141	0.350573	0.004789	191	0.927563	0.007669
42	0.575656	0.070810	92	0.024740	0.029271	142	0.362249	0.005773	192	0.939024	0.006179
43	0.564085	0.071819	93	0.018128	0.024691	143	0.373927	0.006763	193	0.950442	0.004650
44	0.552507	0.072792	94	0.012824	0.020420	144	0.385614	0.007756	194	0.961678	0.003100
45	0.540921	0.073733	95	0.008828	0.016631	145	0.397299	0.008749	195	0.972300	0.001596
46	0.529332	0.074640	96	0.005936	0.013388	146	0.408978	0.009737	196	0.981352	0.000277
47	0.517739	0.075515	97	0.003881	0.010646	147	0.420654	0.010720	197	0.988080	-0.000735
48	0.506141	0.076358	98	0.002430	0.008308	148	0.432325	0.011695	198	0.992743	-0.001453
49	0.494539	0.077170	99	0.001415	0.006287	149	0.443994	0.012663	199	0.996048	-0.001973
50	0.482938	0.077951	100	0.000720	0.004516	150	0.455656	0.013622	200	0.998527	-0.002369
									201	0.999874	-0.002584